

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ**

**Державний вищий
навчальний заклад
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
(ДВНЗ «ПДТУ»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***ВІСНИК
ПРИАЗОВСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ***

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Видається 2 рази на рік
з 1995 року**

Випуск 53. Том 1

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2026

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

**State higher
educational institution
«PRIAZOVSKYI STATE
TECHNICAL UNIVERSITY»
(SHEI «PSTU»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***REPORTER
OF THE PRIAZOVSKYI
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY***

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 53. Volume 1

Section: Technical sciences

Dnipro, 2026

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2026. Вип. 53, том 1. 269 с. DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.

У збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень вчених вищого навчального закладу та провідних спеціалістів у галузі технічних наук, показаний їхній вклад у розвиток науки та сучасних технологій. Публікації видання зберігаються на офіційному сайті Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Іщенко А.О.

Angeliki G. Lekatou

Hossam Ahmed Mohamed

Halfa

Sergey Edward Lyshevski

Dmytro Makarchuk

Oleksandr Vrublevskiy

Азархов О.Ю.

Белоконь К.В.

Білоусов Є.В.

Булгаков М.П.

Бялобржеський О.В.

Головань А.І.

Грицук І.В.

Губинський М.В.

Єфременко В.Г.

Кириллова О.В.

Клецька О.В.

Ковалевська О.С.

Кухар В.В.

Лук'яненко А.О.

Мазур В.О.

Маменко П.П.

Онищенко О.А.

Парфененко Ю.В.

Петренко Т.Г.

Плахтій О.А.

Позорлецький Д.С.

Проніна О.І.

Прус В.В.

Пятикоп О.Є.

Саенко Ю.А.

Симоненко Р.В.

Сілі І.І.

Тарандушка А.А.

Твердомед В.М.

Ткачов В.В.

Худяков І.В.

Чабак Ю.Г.

Чеберячко Ю.І.

Чупринов Є.В.

Шумило О.М.

Савенко О.С.

Сорокіна М.Є.

головний редактор, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), Greece

Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt

Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, USA

PhD, Solent University, Southampton, UK

Dr., PhD, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Olsztyn, Poland

д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет, Україна

д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія, Україна

канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, Україна

канд. техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського, Україна

д-р техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, Україна

д-р техн. наук, проф., Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна

д-р техн. наук, проф., Національна металургійна академія України, Україна

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

канд. техн. наук, доц., Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

д-р техн. наук, проф., «Технічний університет «Метінвест Політехніка», Україна

канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Національної академії наук України, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

доктор філософії, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, проф., НУ «Одеська морська академія», Україна

канд. техн. наук, доц., Сумський державний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Україна

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Україна

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Національний транспортний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Черкаський державний технологічний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., Державний університет інфраструктури та техно-

логії, Україна

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

канд. техн. наук, доц., Державний університет економіки і технологій, Україна

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, Україна

відповідальний секретар, канд. техн. наук, ДВНЗ «ПДТУ», Україна

коректор, ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Адреса: ДВНЗ «ПДТУ», проспект Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.

Телефон редакції: (098) 480-24-03.

E-mail: vestnik.pgту@gmail.com, vestnik_pgту@pstu.edu (для надсилання статей).

Ідентифікатор в Реєстрі суб'єктів у сфері друкованих медіа – R30-02289, згідно з рішенням Нацради України з питань телебачення і радіомовлення від 21.12.2023 № 1821. Збірник входить до переліку наукових фахових видань (категорія «Б»), в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт, згідно з Наказами Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020, № 886 від 02.07.2020.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 9 від 26.03.2026 р.

ISSN 2225-6733 (Print), ISSN 2519-271X (Online)

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

**Пополов Д.В., Засельський В.Й.,
Учитель О.Д., Швед С.В.,
Засельський І.В., Зелова К.Є.**
Промислові дослідження роботи вібраційно-сортувальних машин з сіючою поверхнею ударної дії

**D.V. Popolov, V.Y. Zaselskyi,
O.D. Uchytel, S.V. Shved,
I.V. Zaselskyi, K.Ye. Zielova**
154 *Industrial studies of the operation of vibrating screening machines with an impact-action screening surface*

**Слабий О.О., Гриджук А.С.,
Дмитрів І.В., Суглобов В.В.,
Русаченко О.В.**
Дослідження навантаженості ковша облицьованого гумотканними матами при навантаженні сипучих матеріалів

**O.O. Slaby, A.S. Gridzhuk,
I.V. Dmytriv, V.V. Suglobov,
O.V. Rusachenko**
162 *Tresearch on the loading of a bucket lined with humid mats when loading bulk materials*

Попов С.В., Скоряк Ю.Б.
Експериментальна оцінка ефективності конструкції молоткової дробарки

S.V. Popov, Y.B. Skoriak
170 *Experimental evaluation of the efficiency of the hammer mill design*

Зенкін М.А., Ремезовський О.М.
Наукове обґрунтування комбінованих технологій обробки поверхонь відповідальних деталей друкарського обладнання для подовження їх ресурсу

M.A. Zenkin, O.M. Remezovskiy
178 *Scientific substantiation of combined surface treatment technologies for critical printing equipment components to extend their service life*

Ясенчук В.В., Гулієнко С.В.
Новітні досягнення в дослідженні гідродинаміки мембранних каналів: критичний огляд

V.V. Yasenchuk, S.V. Hulienko
188 *Recent advances in the investigation of membrane channel hydrodynamics: a critical review*

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

**Chuprynov Ye.V., Kassim D.A.,
Hrybkov E.P., Malii Kh.V., Rekov Yu.V.**
Development of the service for calculating the material and thermal balance of steel smelting

**Ye.V. Chuprynov, D.A. Kassim,
E.P. Hrybkov, Kh.V. Malii, Yu.V. Rekov**
206 *Development of the service for calculating the material and thermal balance of steel smelting*

Пашинська О.Г.
Дослідження процесів старіння холоднокатаного прокату з киплячих марок сталі

O. Pashynska
214 *Research into the ageing processes of cold-rolled products made from boiling steel grades*

**Чубенко В.А., Ярош Т.П.,
Хіноцька А.А.**
Удосконалення процесу виготовлення металевих виробів у машинах безперервного лиття заготовок

**V.A. Chubenko, T.P. Yarosh,
A.A. Khinotska**
222 *Improvement of the production process of metal products in continuous casting machines*

УДК 631.363.21

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359806

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ**Попов С.В.***канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua;***Скоряк Ю.Б.***ст. викладач, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9220-1827>, e-mail: yuliia.skoriak@pdau.edu.ua*

Наведено результати експериментальної оцінки ефективності використання конструкції молоткової дробарки. Вона призначена для подрібнення зернових матеріалів. Дослідження були спрямовані на визначення енергетичних показників, продуктивності та якості подрібнення зернових культур (пшениця, ячмінь, кукурудза). Наведено методику експериментів. Вона містить вимірювання питомих витрат електричної енергії, визначення гранулометричного складу продукту помелу за методом ситового аналізу. Встановлено вплив фізико-механічних властивостей зерна, конструктивних параметрів дробарки на ефективність її роботи. Отримані результати можуть бути використані під час проектування та удосконалення подрібнювального обладнання.

Ключові слова: молоткова дробарка; деталі машин; зернові матеріали; подрібнення; енергоефективність; експериментальні дослідження; якість подрібнення; конструкція машини; гранулометричний склад; машинобудування.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності машин для подрібнення зернових матеріалів – важливе завдання сучасного машинобудування та агропромислового комплексу. Молоткові дробарки широко застосовуються у комбикормовому виробництві. Вони прості за конструкцією, універсальні та високопродуктивні. Разом із тим значна частина таких машин характеризується підвищеною енергоємністю, нерівномірною якістю подрібнення, прискореним зношуванням окремих деталей робочих органів. Це обумовлено недостатнім обґрунтуванням конструктивних параметрів молотків, решіт, ротора та режимів роботи з урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів [1–3].

Надмірні питомі витрати електроенергії та утворення великої кількості пилоподібних фракцій негативно впливають на економічні показники експлуатації обладнання, якість кінцевого продукту. Особливо актуальним є це питання для малих і середніх виробництв, де застосовуються компактні конструкції дробарок із обмеженими можливостями регулювання робочого процесу. У зв'язку із цим виникає потреба у проведенні експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку ефективності конструкції молоткової дробарки за показниками енергоефективності, продуктивності та якості подрібнення зернових культур.

Отримання експериментальних даних дозволяє встановити взаємозв'язок між конструктивними рішеннями, робочими параметрами машини та результатами подрібнення, а також сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо удосконалення деталей і вузлів дробарок. Це зумовлює актуальність дослідження ефективності конструкції молоткової дробарки з позиції спеціальності «Машинобудування» спеціалізації «Технологічні машини та обладнання» [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наукових публікацій свідчить, що проблематика підвищення ефективності молоткових дробарок для подрібнення зернових матеріалів залишається актуальною як для українських, так і для закордонних дослідників. Актуальним є зниження енергоємності процесу, підвищення якості подрібнення, обґрунтування раціональних конструктивних і режимних параметрів обладнання. Узагальнення результатів дозволить виявити наявні підходи, їх переваги та обмеження, а також визначити напрями подальшого удосконалення конструкцій молоткових дробарок.

Аналіз впливу конструктивних параметрів на продуктивність, якість подрібнення зернових проведено у роботі [5]. Показано, що зміна геометрії молотків, відстані до решіт прямо змінюють енергоспоживання та фракційний склад. Експериментально обґрунтовані функціональні залежності, здійснено вимірювання енергетичних витрат та гранулометрії. Дослідження проведені на незначному діапазоні швидкостей ротора, використано одну типову решітку, мало уваги приділено тривалому зношуванню деталей за реальних умов.

Стаття [6] присвячена економічному оцінюванню модернізації підготовчого етапу технологічних процесів, включаючи подрібнення зерна, з акцентом на співвідношення «енергетичні витрати – продуктивність». Розрахунки засвідчили, що модернізація робочих вузлів та контроль вологості дають помітну економію при великому обсязі матеріалу. Робота має чітку економічну спрямованість, а також корисні підказки для прийняття виробничих рішень. Характеризується незначною кількістю експериментів щодо гранулометрії, а також побічними припущеннями стосовно вартості обслуговування.

Авторами [7] вивчено вплив вологості насіння на вихід кінцевого продукту під час подрібнення у

молотковому та валковому обладнанні. Методика – лабораторні досліди із визначенням виходу по ситам. Визначено оптимальний діапазон вологості для конкретного випадку (11...12%), при відхиленні від якого вихід дрібної фракції зменшується. Дослідження характеризується чіткою експериментальною методикою, практичними рекомендаціями стосовно вологості для оптимального помелу. Досліди проводилися на горохові, а не на зернових, тому пряме перенесення на кукурудзу, пшеницю та ячмінь потребує уточнення.

Дослідженню довговічності та безвідмовності підсистем молоткових дробарок у реальних умовах експлуатації на основі системного підходу та ймовірнісних моделей присвячено роботу [8]. Визначено найменш надійні підсистеми та характер розподілу відмов, що дозволяє обґрунтувати напрями підвищення надійності кормоподрібноувальної техніки. Використано апарат теорії надійності. Виявлено конкретну вузьку ланку, а саме подрібнювальну камеру із кількісним розподілом кормів. На жаль, робота має обмежену кількість експериментальних даних, характеризується відсутністю детального опису умов випробувань. Відсутнє порівняння із сучасними конструкціями. Недостатньо практичних рекомендацій стосовно конструктивних змін із кількісним оцінюванням ефекту.

Експериментальне порівняння запропонованої конструкції машини із класичними подано у джерелі [9]. Доведена істотна економія енергії при грубому подрібненні. Робота характеризується якісними експериментами. Чітке порівняння із загальновідомими режимами обробки. Застосовано практично важливі показники (енергія на тону, ступінь подрібнення). Отримані результати не зовсім корелюються із зерновими (кормовими) матеріалами.

Авторами [10] порівнюються класична та нова геометрія молотків (різні кути, форми) помелу тритикале. Зазначено, що деякі нові форми ротора підвищують продуктивність, знижують рівень енергоспоживання. Наведена ретельна лабораторна методика. Використано сучасні вимірювальні прилади. Здійснено статистичний аналіз. Тим не менш, досліди обмежені кількістю зернових культур. Вони не дають повної картини для широкого спектру вологості, матеріалів.

Поєднання математичної моделі із експериментальною валідацією на реальному підприємстві засвідчило до 18% економії енергії та поліпшення однорідності частинок [11]. Модель має високий коефіцієнт апроксимації. Нажаль, модель є складною для швидкого перенесення на інші типи дробарок без додаткового уточнення.

Експериментальне дослідження специфічного молотково-лезової дробарки для гілок із RSM-аналізом параметрів (діаметр, довжина, вологість) наведено в [12]. Робота характеризується визначенням оптимальних параметрів процесу за методом експериментального планування, детальною статистикою, а також практичними рекомендаціями. Кінцеві висновки потребують адаптації під зернові культури.

Отримані регресійні моделі якості помелу й питомої енергії для дробарки за результатами експериментального дослідження переробки пивних дробин [13]. Робота характеризується практичною орієнтацією, чітким визначенням оптимальних характеристик (швидкість, подача, проміжок). Серед недоліків слід відзначити обмежене застосування за межами конкретної сировини, що була розглянута.

Робота [14] сфокусована на оптимізації параметрів молоткового помелу для енергетичної біомаси із використанням статистичних моделей для зниження питомої енергії. Наявний системний статистичний підхід. Чимала увага приділена енергоефективності, повторюваності експериментів для різних біомас. Результати є специфічними, бо пов'язані із конкретною продукцією.

У джерелі [15] здійснено короткий аналіз, що полягає у проведенні експериментів та моделювання для вивчення впливу швидкості ротора, геометрії камери, інших параметрів на ступінь подрібнення. Дослідження характеризується комплексним підходом, широким діапазоном режимів руху зерен. Не використано сучасні підходи, що полягають у використанні DEM-моделей.

Поєднання деталізованого DEM-моделювання із параметричним експериментальним калібруванням процесу помелу кукурудзи у молотковій дробарці простежується у роботі [16]. Сильними сторонами дослідження є точне калібрування моделі на експериментах, можливість прогностично вивчати вплив конструктивних змін без дорогих стендових випробувань. Тим не менш, DEM-підхід чутливий до параметрів модельованих властивостей матеріалу. Також отримані результати потребують експериментальної валідації для нових видів сировини або іншої геометрії робочої камери.

Узагальнення проаналізованих джерел інформації засвідчило, що підвищення ефективності молоткових дробарок переважно зосереджено на зниженні питомих енерговитрат, покращенні гранулометричного складу, обґрунтуванні раціональних конструктивних і режимних параметрів. Більшість робіт демонструє позитивний вплив оптимізації геометрії молотків, швидкості ротора, вологості матеріалу, однак часто обмежуються вузькими діапазонами режимів або конкретною сировиною. Перспективним напрямом є поєднання експериментальних досліджень із математичним та DEM-моделюванням. Саме такий підхід дозволяє прогнозувати ефект від конструктивних змін. Водночас недостатньо уваги приділено питанням універсальності рішень для різних зернових культур. Це й зумовлює необхідність подальших досліджень.

Мета статті

Метою статті є експериментальна оцінка ефективності конструкції молоткової дробарки для подрібнення зернових матеріалів. Для досягнення

поставленої мети у роботі передбачено розв'язання таких завдань: 1) дослідити енергетичні показники роботи дробарки під час подрібнення зернових культур (пшениця, ячмінь, кукурудза); 2) визначити питомі витрати електроенергії та продуктивність установки; 3) оцінити якість подрібнення за гранулометричним складом продукту помелу; 4) проаналізувати вплив фізико-механічних властивостей зерна та конструктивних параметрів робочих органів на ефективність процесу подрібнення. Отримані результати планується використати для обґрунтування раціональних конструктивних рішень та підвищення надійності обладнання за виробничих умов комбікормових підприємств.

Виклад основного матеріалу

Під час проведення експериментальних досліджень як об'єкт подрібнення було використано зерно кукурудзи, ячменю та пшениці. Усі досліджувані культури відповідали чинним нормативним вимогам за показниками вологості, вмісту токсичних елементів, пестицидів, рівнем засміченості та іншими якісними характеристиками. Зерно пшениці перебувало в задовільному стані: без ознак прілості та теплових пошкоджень після сушіння, з властивими йому запахом та забарвленням. Основні фізико-механічні показники пшениці наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні показники пшениці

Найменування показника	Значення
Вологість, не більше, %	14,5
Зернові домішки, не більше, %	8,0
Домішки сміття, не більше, %	3,0
Сажкове зерно, не більше, %	5,0
Масова частка білка, не менше, %	14,0
Масова частка клейковини, не менше, %	30,0
Якість клейковини: група, одиниць приладу ВДК	I, 45-75

Ячмінь додається для оздоровлення, підвищення витривалості худоби. Окрім того, краще перетравлюється та має корисні властивості (табл. 2). Для кормових цілей кукурудза підходить любого типу, зокрема у виді сумішей (табл. 3). Зерно кукурудзи здорове, із нормальним кольором та запахом.

Таблиця 2

Фізико-механічні показники ячменю

Найменування показника	Значення
Вологість, не більше, %	15,5
Зернові домішки, не більше, %	15,0
Домішки сміття, не більше, %	5,0
Мінеральні домішки, не більше, %	1,0
Шкідливі домішки, %	0,2

Таблиця 3

Фізико-механічні показники кукурудзи

Найменування показника	Значення
Вологість, не більше, %	15,0
Сміттєві домішки, не більше, %	5,0
Зернова домішка, не більше, %	15,0

Розроблена конструкція молоткової дробарки ДМ-360 призначена для подрібнення різних видів сировини, відзначається простотою будови, зручністю експлуатації та технічного обслуговування (рис. 1, табл. 4) [4]. Її характерною особливістю є можливість швидкої заміни найбільш зношуваних елементів, зокрема деки, молотків, решета.



Рис. 1 – Дробарка молоткова

Таблиця 4

Технічна характеристика молоткової дробарки [4]

№ з.п.	Найменування характеристики	Одиниці виміру	ДМ-360
1	Продуктивність	кг/год	140...365
2	Частота обертання головної осі	об/хв	3000
3	Робочий діаметр ротора	мм	360
4	Кількість молотків	шт.	6
5	Потужність	кВт	5,5
6	Габаритні розміри	м	550×400×860
7	Маса	кг	60

Дробарка може використовуватися для середнього, дрібного подрібнення матеріалів. Робочим органом є ротор із закріпленими на ньому молотками. Вони виконують функцію ударних елементів. Завдяки невеликим габаритним розмірам обладнання може експлуатуватися за умов обмеженого виробничого простору. Герметичне виконання корпусу дає змогу під'єднати завантажувальні та розвантажувальні ємності, забезпечує мінімальний викид пилу в навколишнє середовище.

Розмір отворів решета суттєво впливає на дисперсність продукту. Експеримент здійснювався на решеті із діаметром отворів 3 мм. Для оцінки та порівняння якості подрібнення визначали середній вміст окремих фракцій. Маса проби становила 3 кг (табл. 5).

Таблиця 5

Дослідження енергоефективності

№ з.п.	Матеріал	Час подрібнення		Питома витрата енергії, Вт·год/кг		Продуктивність, кг/год
		хв.	год.	визначена	середнє	
1	Пшениця	1,11	0,018	33,0	34,4	160
2		1,16	0,019	34,8		
3		1,13	0,019	34,8		
4		1,17	0,019	34,8		
1	Кукурудза	0,47	0,008	14,6	15,1	364
2		0,50	0,008	14,6		
3		0,47	0,008	14,6		
4		0,52	0,009	16,5		
1	Ячмінь	1,43	0,024	44	40,3	136,5
2		1,24	0,021	38,5		
3		1,27	0,021	38,5		
4		1,29	0,022	40,3		

Питома витрата енергії, E , Вт·год/кг:

$$E = t \cdot P / m, \quad (1)$$

де t – час подрібнення, год;

P – потужність електричного двигуна, Вт;

m – маса проби, кг.

Якість подрібнення визначалася за методикою ДСТУ ISO 27708:2013 «Комбікорми. Метод визначення крупності за допомогою методів сіткового аналізу». Використано ситовий класифікатор для оцінки якості подрібнення із наступною послідовністю: 1) відбір 1 кг проби кожного помелу; 2) комплект сит (перше – 1 мм, друге – 2 мм, третє – 3 мм); 3) на верхнє сито насипалася оброблена проба, закріплювалася кришка із набором решіт; 4) сортування на фракції протягом 3 хв; 5) зважування залишеної на решетах фракції та

прохід нижнього решета; 6) обробка результатів. У табл. 6, 7 наведено результати ситового аналізу.

Таблиця 6

Результати ситового аналізу

№ з.п.	Зерновий матеріал	Маса компонентів суміші, г			
		Діаметр решіт, мм			
		піддон	1	2	3
1	Пшениця	240	360	250	150
2		260	340	250	150
3		250	330	270	150
4		255	345	250	150
1	Ячмінь	100	150	300	450
2		110	140	290	460
3		95	155	305	445
4		105	145	310	440
1	Кукурудза	410	300	190	100
2		390	310	200	100
3		420	290	180	110
4		400	310	190	100

Таблиця 7

Обробка експериментальних даних (ситовий аналіз)

Пшениця					
Отвір сита	Середнє, г	Стандартне відхилення, г	Коефіцієнт варіації, %	Абсолютна похибка, г	Відносна похибка, г
Піддон	251,25	8,54	3,40	4,27	1,70
1 мм	343,75	12,50	3,64	6,25	1,82
2 мм	255,00	10,00	3,92	5,00	1,96
3 мм	150,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кукурудза					
Отвір сита	Середнє, г	Стандартне відхилення, г	Коефіцієнт варіації, %	Абсолютна похибка, г	Відносна похибка, г
Піддон	405,00	12,91	3,19	6,45	1,59
1 мм	302,50	9,57	3,17	4,79	1,58
2 мм	190,00	8,16	4,30	4,08	2,15
3 мм	102,50	5,00	4,88	2,50	2,44
Ячмінь					
Отвір сита	Середнє, г	Стандартне відхилення, г	Коефіцієнт варіації, %	Абсолютна похибка, г	Відносна похибка, г
Піддон	102,50	6,45	6,30	3,23	3,15
1 мм	147,50	6,45	4,38	3,23	2,19
2 мм	301,25	8,54	2,83	4,27	1,42
3 мм	448,75	8,54	1,90	4,27	0,95

З метою зменшення утворення пилоподібних фракцій під час подрібнення доцільно збільшувати діаметр отворів решета. Підвищений вміст пилу свідчить про несприятливі умови виведення матеріалу з робочої камери, внаслідок чого частинки затримуються всередині, зазнають повторного подрібнення.

Під час досліджень встановлено, що гранулометричний склад зерна після подрібнення характеризується незначними відхиленнями між окремими дослідженнями. Це підтверджує стабільність перебігу процесу подрібнення.

Для пшениці коефіцієнт варіації знаходиться у межах 3...4%. Це свідчить про достатньо рівномірний помел, мінімальні розбіжності між результатами дослідів. Абсолютна похибка середнього значення не перевищує 6,3 г, а відносна – 2%. Вважаємо отримані результати достовірними.

Для кукурудзи також зафіксовано незначну варіацію показників – 3...5%. При цьому відносна похибка не перевищує 2,5%. Це вказує на однорідний і стабільний характер подрібнення. Найменші коливання спостерігаються для фракцій, що затримуються на ситах із отворами 1...2 мм, що відповідають основному помелу.

У випадку ячменю відмічається дещо підвищена варіація дрібних фракцій – до 6%. Це зумовлено неоднорідністю будови зерна, наявністю оболонок, що ускладнюють рівномірне дроблення. Водночас для крупних частинок (сито 3 мм) коефіцієнт варіації зменшується до 1...2%. Це є характерним для грубого помелу.

Проведемо аналіз фракційного складу зернового матеріалу, що зазнав подрібнення (рис. 2).

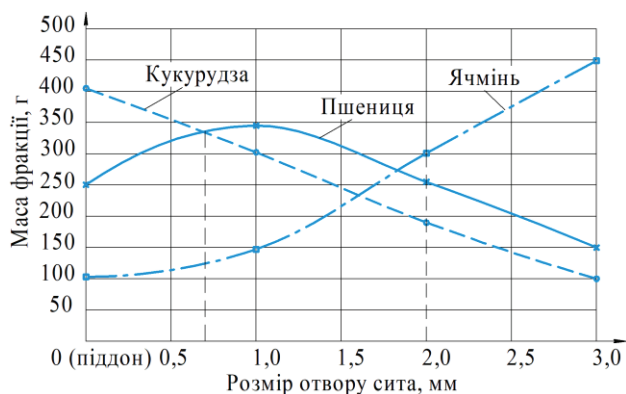


Рис. 2 – Середні значення фракційного складу подрібненого зерна

Ячмінь характеризується волокнистою структурою, підвищеними енергетичними витратами під час подрібнення. Внаслідок цього переважають крупні фракції із максимальним вмістом на ситі із отворами 3 мм. Помел найгрубіший. Пшениця має тверде зерно, проте відсутність оболонки забезпечує більш рівномірне подрібнення. При цьому найбільша частка

матеріалу припадає на середні фракції. Помел середній. Кукурудза відзначається крихкістю. Вона легко піддається руйнуванню. Формується переважно дрібнодисперсний продукт із основною масою частинок на піддоні та ситі з отворами 1 мм. Помел найдрібніший. Взагалі оптимальними для практичного використання є розміри частинок 0,7...2,0 мм.

Висновки

1. Експериментально встановлено, що енергетичні показники процесу подрібнення істотно залежать від виду зернової культури, її фізико-механічних властивостей. Найбільша питома втрата електроенергії зафіксована під час подрібнення ячменю – 40,3 Вт·год/кг. Це пояснюється наявністю плівки та волокнистої структури зерна, що ускладнюють його руйнування. Для пшениці середня питома витрата становить 34,4 Вт·год/кг, а для кукурудзи – лише 15,1 Вт·год/кг. Це зумовлено її підвищеною крихкістю та меншою міцністю зернівки.

2. Встановлено обернену залежність між питомими витратами енергії та продуктивністю дробарки. Найвище її значення отримано при подрібненні кукурудзи – 364 кг/год, що супроводжується мінімальними енерговитратами. Для пшениці продуктивність становить 160 кг/год, а для ячменю – 136,5 кг/год. Це підтверджує нижчу енергетичну ефективність процесу подрібнення ячменю за однакових конструктивних і режимних параметрів дробарки.

3. Ситовий аналіз засвідчив, що процес подрібнення є стабільним, а фракційний склад продукту має незначну варіацію між дослідженнями. Для пшениці коефіцієнт варіації становить 3...4%, що свідчить про рівномірний середній помел. Для кукурудзи варіація також незначна (3...5%). При цьому переважають дрібні фракції, що характеризує найдрібніший помел. Для ячменю спостерігається підвищена варіація на дрібних фракціях (до 6%) і переважання крупних частинок, що відповідає грубому помелу. Раціональним гранулометричним складом для комбікормового виробництва є частинки у межах 0,7...2,0 мм, що в найбільшій мірі забезпечуються під час подрібнення пшениці.

4. Доведено, що фізико-механічні властивості зерна (міцність, крихкість, наявність оболонок) мають визначальний вплив на ефективність подрібнення. Ячмінь внаслідок плівчастої структури потребує багаторазових ударів молотків. Це підвищує енерговитрати, знижує рівномірність помелу. Кукурудза, навпаки, легко руйнується, що зменшує тривалість перебування частинок у камері подрібнення та знижує енергоспоживання. Встановлено, що діаметр отворів решета суттєво впливає на фракційний склад, кількість пиловидних частинок: їх підвищений вміст свідчить про повторну циркуляцію матеріалу в камері та недосконалі умови його відведення. Отже оптимізація конструктивних параметрів решіт є важливим резервом підвищення ефективності процесу подрібнення.

Перелік використаних джерел

- [1] Технологічні машини: підручник / Гнітько С. М., Бучинський М. Я., Попов С. В., Чернявський Ю. А. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 258 с.
- [2] Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Полтава : НУПП, 2019. 204 с.
- [3] Визначення оптимальних робочих параметрів технологічного обладнання методом ортогонального планування експерименту / Попов С. В., Левченко Ю. В., Басова Ю. О., Попов К. С. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КРНУ, 2023. Вип. 2(139). С. 130-137. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.2.15>.
- [4] Біловод О. І., Попов С. В., Скоряк Ю. Б. Розробка та дослідження енергоощадної молоткової дробарки. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, ТДАТУ, 03-28 листопада 2025 р. Запоріжжя, 2025. С. 157-159.
- [5] Рибальченко В. Д., Костенко О. М. Вплив конструкторних параметрів робочих органів дробарки на процес подрібнення зерна. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КРНУ, 2023. Випуск 4(141). С.138-145. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.4.17>.
- [6] Купчук І. М., Вовк В. Ю., Дацюк Д. А. Оцінка економічної ефективності технічної модернізації підготовчого етапу технологічного процесу виробництва етанолу. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький: ХНУ, 2020. Вип. 2(283). С. 36-46. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-283-2-36-46>.
- [7] Kharchenko Ye., Sharan A., Yermeeva O. Dependence of flour yield on moisture content of chickpea seeds. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2024. Vol. 12, iss. 2. Pp. 161-174. DOI <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2024-12-2-7>.
- [8] Болтянський О. В., Болтянська Н. І. Дослідження довговічності та безвідмовності підсистем молоткових дробарок в процесі їх експлуатації. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 156. С. 636-640.
- [9] Experimental evaluation of the conjugate anvil hammer mill – Comparison of semi-confined to confined particle breakage / G. Li et al. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 134. Pp. 221-231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.024>.
- [10] Bochat A., Wesołowski L., Zastempowski M. A comparative study of new and traditional designs of a hammer mill. *Transactions of the ASABE*. 2015. Vol. 58, no. 6. Pp. 1737–1746. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10691>.
- [11] Mathematical model to improve energy efficiency in hammer mills and its use in the feed industry: analysis and validation in a case study in Cuba / Y. Castillo-Alvarez et al. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 5. Article 1523. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13051523>.
- [12] Experimental study on the cutting and crushing performance of Caragana korshinskii strips / De X., Li H., Kang J., Yang J. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, no. 9. Article 1584. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091584>.
- [13] Study on performance evaluation and optimization of brewers grains hammer mill / Anh D. L., Tuan N. A., Hung N. V., Thang T. Q. *AIP Conference Proceedings*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 9 April 2021. Vol. 2406. Article 020003. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0066721>.
- [14] Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling / Paraschiv G. et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 2. Article 973. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020973>.
- [15] Naik S., Feng Y., Chaudhuri B. Experiment and model-based investigation of combination in a hammer mill. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2014. Vol. 2, no. 4. Pp. 362–373. DOI: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V2-N4-362-373>.
- [16] Chiaravalle A. G., Piña J., Cotabarren I. DEM simulation of maize milling in a hammer mill. *Powder Technology*. 2025. Vol. 431. Article 120892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120892>.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE HAMMER MILL DESIGN

- Popov S.V.** PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua;
- Skoriak Y.B.** senior lecturer, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9220-1827>, e-mail: yuliia.skoriak@pdau.edu.ua

Improving the efficiency of machines used for grinding cereal materials is an important task of modern mechanical engineering and the agro-industrial sector. Hammer mills are widely applied in compound feed production due to their simple design, versatility, and high productivity. However, many existing designs are characterized by increased specific

energy consumption, uneven grinding quality, and accelerated wear of working elements, which is largely caused by insufficient justification of design parameters and operating modes with regard to the physical and mechanical properties of grain materials. This paper presents an experimental evaluation of the efficiency of a hammer mill design intended for grinding cereal crops. Experimental studies were carried out using wheat, barley, and maize as grinding materials. All tested grains met regulatory requirements in terms of moisture content and quality indicators. The research focused on determining the specific electrical energy consumption, productivity of the installation, and grinding quality based on particle size distribution. The experiments were performed on a laboratory hammer mill equipped with a rotor operating at a rotational speed of 3000 rpm and a 5.5 kW electric motor. The particle size distribution of the ground product was evaluated by sieve analysis in accordance with relevant standards. Statistical processing of the results was carried out to assess the stability and repeatability of the grinding process. The obtained results showed that energy consumption and productivity significantly depend on the type of grain and its physical and mechanical properties. The highest specific energy consumption was observed during barley grinding, while maize required the least energy and provided the highest productivity. Wheat demonstrated intermediate values and ensured the most uniform particle size distribution. It was established that the diameter of sieve openings has a considerable influence on the amount of fine particles and dust formation. The results confirm that optimization of design parameters of hammer mills, particularly sieve geometry and working element configuration, allows improving energy efficiency, grinding quality, and operational reliability. The findings can be used to substantiate rational design solutions and to enhance the performance of hammer mills under production conditions.

Keywords: hammer mill; machine parts; cereal materials; grinding; energy efficiency; experimental studies; grinding quality; machine design; particle size distribution; mechanical engineering.

References

- [1] S. M. Hnitko, M. Ya. Buchynskiy, S. V. Popov, and Yu. A. Cherniavskiy, *Tekhnologichni mashyny* [Technological machines]. Kyiv, Ukraine: Lira-K Publ., 2020. (Ukr.)
- [2] Ye. A. Frolov, S. I. Kravchenko, S. V. Popov, and S. M. Hnitko, *Tekhnologichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia: monohrafiia* [Technological support of product quality in mechanical engineering: Monograph]. Poltava, Ukraine: NUPP Publ., 2019. (Ukr.)
- [3] S. V. Popov, Yu. V. Levchenko, Yu. O. Basova, and K. S. Popov, "Vyznachennia optymalnykh robochykh parametriv tekhnologichnoho obladnannia metodom ortohonalnoho planuvannia eksperymentu" ["Determination of optimal operating parameters of technological equipment by the method of orthogonal experimental design"], *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. 2(139), pp. 130-137, 2023. doi: 10.32782/1995-0519.2023.2.15. (Ukr.)
- [4] O. I. Bilovod, S. V. Popov, and Yu. B. Skoriak, "Rozrobka ta doslidzhennia enerhooschadnoi molotkovoї drobarok" ["Development and research of an energy-saving hammer mill"], in *Proc. 7th Int. Sci.-Pract. Conf. «Technical Support of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex»*, Zaporizhzhia, Ukraine, Nov. 03–28, 2025, pp. 157-159. (Ukr.)
- [5] V. D. Rybalchenko, and O. M. Kostenko, "Vplyv konstruktivnykh parametriv robochykh orhaniv drobarok na protses podribnennia zerna" ["Influence of design parameters of crusher working bodies on the grain grinding process"], *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. 4(141), pp. 138-145, 2023. doi: 10.32782/1995-0519.2023.4.17. (Ukr.)
- [6] I. M. Kupchuk, V. Yu. Vovk, and D. A. Datsiuk, "Otsinka ekonomichnoi efektyvnosti tekhnichnoi modernizatsii pidhotovchoho etapu tekhnologichnoho protsesu vyrobnytstva etanolu" ["Assessment of economic efficiency of technical modernization of the preparatory stage of ethanol production"], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Khmelnytskyi National University*, no. 2(283), pp. 36-46, 2020. doi: 10.31891/2307-5732-2020-283-2-36-46. (Ukr.)
- [7] Ye. Kharchenko, A. Sharan, and O. Yermeeva, "Dependence of flour yield on moisture content of chickpea seeds," *Ukrainian Journal of Food Science*, vol. 12, no. 2, pp. 161–174, 2024. doi: 10.24263/2310-1008-2024-12-2-7.
- [8] O. V. Boltianskyi, and N. I. Boltianska, "Doslidzhennia dovhovichnosti ta bezvidmovnosti pidsystem molotkovykh drobarok v protsesi yikh ekspluatatsii" ["Investigation of durability and reliability of hammer mill subsystems during operation"], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva – Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture*, no. 156, pp. 636-640, 2015. (Ukr.)
- [9] G. Li, R. Roufail, B. Klein, L. Nordell, A. Kumar, C. Sun, and J. Kou, "Experimental evaluation of the conjugate anvil hammer mill – Comparison of semi-confined to confined particle breakage," *Minerals Engineering*, vol. 134, pp. 221-231, 2019. doi: 10.1016/j.mineng.2019.03.024.
- [10] A. Bochat, L. Wesołowski, and M. Zastempowski, "A comparative study of new and traditional designs of a hammer mill," *Transactions of the ASABE*, vol. 58,

- no. 6, pp. 1737-1746, 2015. doi: **10.13031/trans.58.10691**.
- [11] Y. Castillo-Alvarez, R. Jiménez Borges, A. Álvarez Hernández, J. Hernández Guillén, and G. Martínez González, "Mathematical model to improve energy efficiency in hammer mills and its use in the feed industry: analysis and validation in a case study in Cuba," *Processes*, vol. 13, no. 5, article 1523, 2025, doi: **10.3390/pr13051523**.
- [12] X. De, H. Li, J. Kang, and J. Yang, "Experimental study on the cutting and crushing performance of *Caragana korshinskii* strips," *Agriculture*, vol. 14, no. 9, article 1584, 2024. doi: **10.3390/agriculture14091584**.
- [13] D. L. Anh, N. A. Tuan, N. V. Hung, and T. Q. Thang, "Study on performance evaluation and optimization of brewers grains hammer mill," *AIP Conference Proceedings*, Ho Chi Minh City, Vietnam, April 9, 2021, vol. 2406, article 020003. doi: **10.1063/5.0066721**.
- [14] G. Paraschiv, G. Moiceanu, G. Voicu, M. Dinca, and E. Stefan, "Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, article 973, 2021. doi: **10.3390/su13020973**.
- [15] S. Naik, Y. Feng, and B. Chaudhuri, "Experiment and model-based investigation of comminution in a hammer mill," *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, vol. 2, no. 4, pp. 362-373, 2014. doi: **10.2495/CMEM-V2-N4-362-373**.
- [16] A. G. Chiaravalle, J. Piña, and I. Cotabarren, "DEM simulation of maize milling in a hammer mill," *Powder Technology*, vol. 431, article 120892, 2025. doi: **10.1016/j.powtec.2025.120892**.

Стаття надійшла 02.01.2026
Стаття прийнята 30.01.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Попов С. В., Скоряк Ю. Б. Експериментальна оцінка ефективності конструкції молоткової дробарки. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 170–177. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359806>.